

Validación experimental de una línea de retardo para trenes de pulsos ópticos reconfigurable eléctricamente.

Experimental verification of an electrically reconfigurable delay line for optical pulse trains

Santiago TAINTA ⁽¹⁾, María J. ERRO ⁽¹⁾, María J. GARDE ⁽¹⁾, Miguel A. MURIEL ⁽²⁾.

1. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía s/n E-31006 Pamplona, España.
2. Departamento de Tecnología Fotónica, ETSIT, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, España.

Persona de contacto: Santiago TAINTA (santiago.tainta@unavarra.es).

RESUMEN:

En este artículo se verifica experimentalmente la sintonía del retardo para un tren de pulsos ópticos ultracortos mediante el uso de tan solo un modulador de fase y un elemento dispersivo cuya dispersión viene fijada por la frecuencia del tren de pulsos de entrada. La sintonía del retardo se realiza mediante la variación de una señal eléctrica periódica cuya velocidad de repetición es similar a la del tren de entrada. Los resultados obtenidos demuestran la posibilidad de obtener valores de retardos arbitrarios dentro de un periodo de repetición y sin distorsión de la forma de los pulsos a la salida del sistema.

Palabras clave: Línea de retardo, pulsos ultracortos, autoimagen temporal, procesado fotónico de señal, modulación de fase

ABSTRACT:

In this contribution, we experimentally demonstrate the tuning of the delay introduced to an ultrashort optical pulse train by using only a phase modulator and a dispersive device whose dispersion is fixed by the input pulse train frequency. The tuning of the delay is achieved with the variation of a periodic electrical signal with a repetition rate similar to the one of the input train. The obtained results show the possibility of introducing arbitrary delays within a repetition period without distorting the shape of the pulses at the system output.

Key words: Delay line, ultrashort pulses, temporal self-imaging, photonic signal processing, phase modulator

1.- Introducción

En los últimos años ha existido un creciente interés en el desarrollo de nuevas técnicas para conseguir líneas de retardo ópticas debido a la multitud de aplicaciones en las que se necesita aplicar un retardo controlado a diferentes señales ópticas. Entre las mencionadas aplicaciones cabe citar los sistemas de multiplexación óptica [1], sistemas de fotónica de microondas [2], sistemas de interferometría

[3] para sensado o radar y tomografía óptica coherente (OCT), procesadores ópticos de señal [4]... Ejemplos de las distintas alternativas para conseguir retardos ópticos son el uso de dispositivos integrados basados en resonadores en anillo [5], el empleo combinado de dispositivos no-lineales para conversión de longitud de onda y elementos dispersivos [6] o los retardadores basados en óptica de volumen.

Uno de los principales requisitos en muchas de las aplicaciones es la posibilidad de variar de manera sencilla y rápida el retardo aplicado. Para ello propusimos el modelo teórico de un sistema que actuaba sobre trenes de pulsos ópticos uniformes que permitía conseguir retardos configurables electrónicamente [7]. Esta técnica estaba basada en la combinación de un modulador electroóptico de fase y el efecto de autoimagen temporal, permitiendo obtener un retardo sintonizable a la salida del sistema en función de la señal aplicada al modulador. Un esquema similar fue demostrado en [8], pero en este caso se empleaba un transformador óptico de Fourier en lugar de un efecto de auto-imagen temporal. Este sistema presentaba serias desventajas, como la necesidad de emplear en una mayor velocidad de las señales eléctricas aplicadas al modulador, el uso de dos elementos dispersivos que han de ser complementarios o la distorsión resultante en los pulsos de salida en muchos de los casos estudiados.

En este artículo se presenta la primera comprobación experimental del sistema basado en autoimagen temporal propuesto en [7]. Además se presentan mejoras en el diseño del sistema que permiten la sintonía del retardo de forma prácticamente continua dentro de todo el periodo de repetición sin tener distorsión significativa de los pulsos sea cual sea el valor del retardo.

2.- Sistema propuesto

El fundamento de operación del sistema propuesto es la propiedad de desplazamiento de la DFT (Transformada Discreta de Fourier). Es bien sabido que la introducción de una fase lineal en el dominio temporal produce un desplazamiento de las componentes espectrales, estando este desplazamiento determinado por la pendiente de la misma:

$$DFT\left\{\left\{c_l e^{j\frac{2\pi}{N}lp}\right\}\right\}_k = C_{k-p} \quad (1)$$

donde c_l son las muestras temporales de la señal, C_k la DFT de dichos coeficientes, N el número de coeficientes y p un número entero. Asimismo, y como ya se demostró en [9], al producirse un efecto de autoimagen

temporal en un tren de pulsos ópticos ultracortos modulados periódicamente, es posible expresar la salida del sistema como:

$$P_{out}(t) \propto \frac{1}{N^2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |C_k|^2 \left| a\left(t + k \frac{T_0}{N} - \frac{T_0}{2}\right) \right|^2 \quad (2)$$

donde N es el número de coeficientes moduladores, C_k es la DFT de dichos coeficientes, $a(t)$ es la forma de los pulsos a la entrada del sistema y T_0 es el periodo de dicho tren de pulsos. Esta relación se cumplirá siempre que la dispersión aplicada verifique la condición

$$\ddot{\phi} = \frac{T_0^2}{2\pi} \quad (3)$$

Además, de forma adicional, para que se verifique (2) será necesario que no se produzca solapamiento entre los pulsos adyacentes a la salida del sistema, lo que se asegura siempre que la anchura de los pulsos sea menor que la tasa de repetición ($\Delta t \ll T_0$).

De esta forma, mediante la aplicación de una fase lineal como la vista en (1) y tomando $c_l = 1$ para $l = 0, \dots, N-1$, y cumpliéndose las dos condiciones vistas antes, es posible expresar la salida del sistema como:

$$P_{out}(t) \propto \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| a\left(t - \frac{T_0}{2} + kT_0 \pm \frac{p}{N}T_0\right) \right|^2 \quad (4)$$

donde se puede observar que la salida se corresponderá con un tren de pulsos cuya forma será similar a la de los pulsos de entrada pero existiendo un retardo adicional a la salida, ΔT , dado por:

$$\Delta T = \frac{T_0}{2} \left(1 \pm \frac{2p}{N}\right) \quad (5)$$

De este modo, modificando la relación existente entre p y N será posible ajustar el retardo derivado en (5) a un valor arbitrario dentro del rango temporal comprendido entre 0 y T_0 .

Para la verificación experimental del esquema propuesto se realizó el montaje experimental presentado en la Figura 1. Como fuente pulsada se usó un láser Calmar con una anchura de pulso de aproximadamente 4 ps y una tasa de repetición fijada por un

generador de onda externo a 9,854 GHz. Dicha señal se usó además para sincronizar la señal eléctrica aplicada a través de un modulador electro-óptico de fase al tren de pulsos ópticos. El tren de pulsos modulado fue dispersado mediante el empleo de una red Bragg linealmente chirpeada como elemento dispersivo. Finalmente, la señal fue detectada mediante un fotodiodo con un ancho de banda de 65 GHz y medida empleando un osciloscopio de alta velocidad.

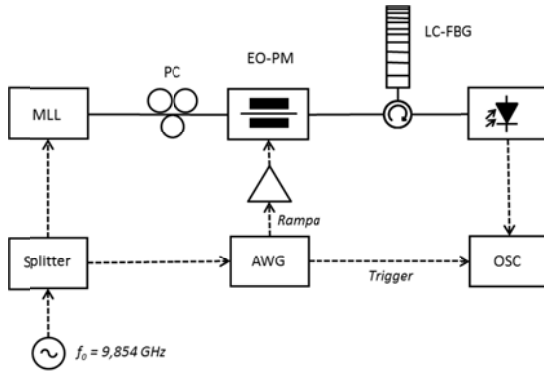


Fig. 1: Montaje experimental del sistema (MLL: Mode Locked Laser, PC: Polarization Controller, EO-PM: Electro Optic-Phase Modulator, LC-FBG: Linearly Chirped-Fibre Bragg Grating, AWG: Arbitrary Waveform Generator, OSC: Osciloscopio)

La señal eléctrica a aplicar en el modulador de fase se obtuvo mediante el uso de un generador de forma de onda arbitraria Tektronix AWG70000A. Para obtener una señal lineal y aprovechando la periodicidad inherente de la fase, se generó una señal de rampa entre 0 y 2π cuya frecuencia de repetición viniera determinada por los parámetros p y N definidos anteriormente. Dado que la duración de los pulsos es muy inferior al periodo de repetición de esta señal, es posible discretizar la rampa ideal tomándose los valores aproximadamente constantes que corresponderían a la posición temporal de cada uno de los pulsos ópticos, tal y como se puede ver en dos ejemplos mostrados en la Figura 2 para $N=10$ y $p=5$ y $p=3$ respectivamente. Esto permitió el uso de un AWG (generador de onda arbitraria) cuya tasa de muestreo era del mismo valor que la frecuencia de repetición de los pulsos (9,854 GHz) y en el que el número de bits de resolución vertical se fijó a 10. Por otra parte, y dado

que la amplitud de la señal a la salida del generador de onda estaba limitada en potencia, fue necesario amplificar la misma hasta una amplitud de $2V_\pi$, siendo V_π el voltaje de media onda del modulador de fase empleado.

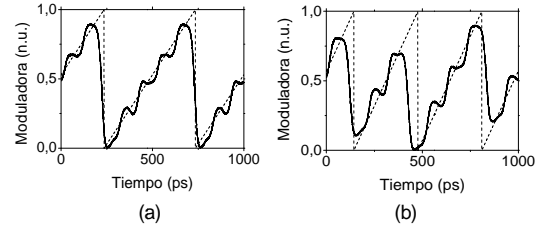


Fig. 2: Ejemplos de señales moduladoras normalizadas comparadas con una rampa ideal para (a) $p=5$ y (b) $p=3$ con $N=10$.

Por último, en la Figura 3 se presenta la respuesta en frecuencia de la red Bragg empleada como elemento dispersivo. Dicha red presenta un ancho de banda superior a los 6 nm y una dispersión de -1640 ps^2 . Este valor de dispersión verifica la condición impuesta por (3) para la frecuencia de operación fijada por el generador de onda (9.854 GHz).

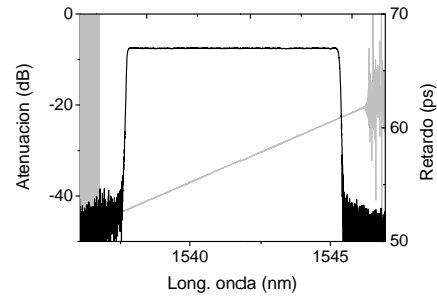


Fig. 3: Respuesta espectral en magnitud (negro) y retardo (gris) de la red Bragg empleada.

3.- Resultados experimentales

A continuación se presentarán los resultados obtenidos para el sistema descrito en el apartado anterior. En primer lugar, a la izquierda de la Figura 4 puede verse el espectro a la entrada y a la salida del sistema. Como se puede comprobar, ambos espectros son similares, exceptuando una atenuación de 7 dB correspondientes a las pérdidas de inserción de los diferentes componentes del sistema. Por tanto, no se producirá ningún ensanchamiento significativo de los pulsos debido al filtrado de la red Bragg usada, al ser su ancho de banda mayor que el de la señal.

Por otra parte, a la derecha de la Figura 4 se muestran los pulsos a la entrada y a la salida del sistema tomando un promedio de 8 pulsos. Como se puede ver, los pulsos a la salida presentan una leve deformación con respecto a la entrada. Hay que tener en cuenta que el limitado ancho de banda del receptor empleado impide la medida precisa de pulsos tan estrechos como los generados en nuestro montaje, por lo que la forma de los mismos está siendo afectada por la propia medida. Por esta limitación, no es posible evaluar exactamente cuál fue el motivo de esta desviación, aunque se cree que la principal causa de la misma ha de ser el rizado presente en el retardo de grupo de la red. Aunque en la Figura 3 no sea apreciable, se ha demostrado [10] que el efecto de autoimagen temporal es muy susceptible a pequeñas fluctuaciones en el retardo de grupo del elemento dispersivo. Por tanto empleando un medio dispersivo con un retardo más lineal, tal como un tramo de fibra, sería posible eliminar estas desviaciones.

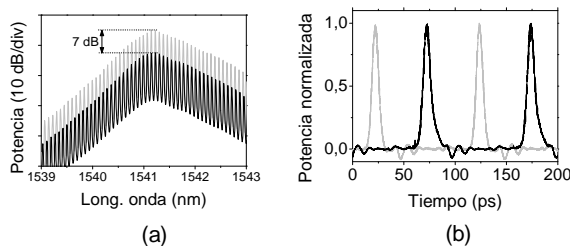


Fig. 4: (a) Espectro y (b) tren de pulsos con promediado a la entrada del sistema (gris) y a la salida del sistema en ausencia de modulación (negro)

En la figura 5 se muestra el tren de pulsos obtenido a la salida del sistema para diferentes valores de p y fijando $N=10$. Como referencia se tomó el tren de pulsos obtenido a la salida cuando no se aplicaba ninguna señal moduladora (esto es, la referencia ya está retardada $T_0/2$ con respecto a la entrada como se deduce de (5) haciendo $p=0$). Observando las diferentes señales, es de resaltar que el retardo medido es muy cercano al esperado según (5). Sin embargo, la potencia de pico al aplicar una señal moduladora se ve reducida desde 12 mW hasta aproximadamente 10 mW. La procedencia de dicha discrepancia viene del driver eléctrico empleado

para amplificar la señal, ya que no permitía llegar hasta amplitudes pico-pico de $2V_\pi$, sino ligeramente inferiores. Por tanto, no fue posible ajustar perfectamente la señal moduladora para conseguir la variación de fase entre 0 y 2π necesaria, aunque podría subsanarse mediante el uso de un amplificador eléctrico de mayor ganancia.

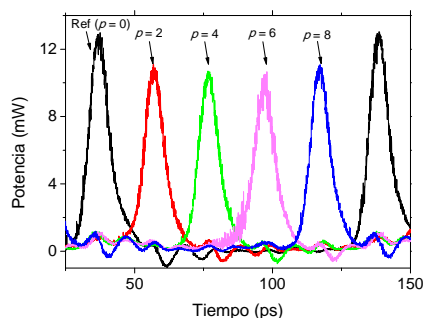


Fig. 5: Tren de pulsos a la salida del sistema para diferentes señales aplicadas al modulador de fase.

Por último, en la Figura 6 se representa el retardo normalizado (izquierda) y la potencia de pico normalizada respecto a la potencia de pico de la señal de referencia (derecha) para valores de p entre 0 y 9. Tal y como se ha visto antes, el retardo obtenido se ajusta casi de forma perfecta al predicho por (5), confirmando la validez del sistema como línea de retardo sintonizable. Puede sintonizarse su valor en todo el rango entre 0 y un periodo de repetición del tren de pulsos de forma continua, sin que el valor de retardo elegido afecte a la forma del pulso a la salida. Este hecho solo puede conseguirse con el ajuste preciso de la forma de la señal eléctrica aplicada, puesto que si se emplea una rampa convencional el retardo que es posible introducir sin distorsión de los pulsos queda limitado a una serie de valores discretos para los que la frecuencia de la rampa es múltiplo exacto de la frecuencia de repetición de los pulsos, como se mostraba en [8] y [9]. Sin embargo, se puede ver que la potencia de pico va a presentar una pequeña fluctuación. Estas variaciones, así como la pérdida de potencia podrían verse mitigadas mediante un mejor ajuste de la amplitud de la señal moduladora.

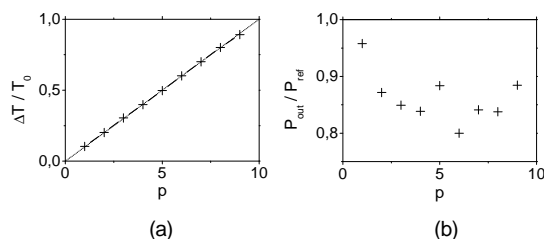


Fig. 6: (a) Retardo normalizado y (b) potencia normalizada a la salida del sistema para diferentes valores de p .

4.- Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado experimentalmente la realización de una línea de retardo óptico para trenes de pulsos ultracortos a través de la combinación de modulación de fase y un elemento de dispersión cromática fija. El valor de retardo conseguido es fácilmente ajustable y puede cubrirse todo el periodo de repetición de la señal de forma continua. Para esta sintonía del retardo es suficiente con variar adecuadamente la señal eléctrica aplicada al modulador electroóptico de fase, que en este trabajo ha sido obtenida mediante un generador arbitrario de señal que opera a la misma velocidad de muestreo que la frecuencia de repetición de los pulsos (en torno a los 10 Gb/s)

Se ha comprobado cómo los retardos medidos en el laboratorio coinciden satisfactoriamente con las predicciones teóricas. La principal y única discrepancia observada fue la presencia de pequeñas variaciones en la potencia de pico de los pulsos de salida debidas a la limitación en los valores de voltaje que en el montaje experimental pudieron aplicarse al modulador de fase.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo económico del Ministerio de Economía y Competitividad, a través del Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental, con los proyectos TEC20010-21305-C04-01 y -02.

Referencias

- [1] X. WU, L. CHRISTEN, O.F. YILMAZ, S.R. NUCCIO, and A.E. WILLNER, "Optical 10–20 and 20–40 Gbits/s pseudorandom bit sequence data multiplexing utilizing conversion–dispersion-based tunable optical delays", *Optics Letters*, vol. 33, no. 13, pp. 1518-1520, 2008.
- [2] M. BURLA, D. MARPAUNG, L. ZHUANG, C. ROELOFFZEN, M. R. KHAN, A. LEINSE, M. HOEKMAN, and R. HEIDEMAN, "On-chip CMOS compatible reconfigurable optical delay line with separate carrier tuning for microwave photonic signal processing", *Optics Express*, vol. 19, no.22, pp. 21475-21484, 2011.
- [3] Z. HE, T. KAZAMA, Y. KOSHIKIYA, X. FAN, F. ITO, and K. OTATE, "High-reflectivity-resolution coherent optical frequency domain reflectometry using optical frequency comb source and tunable delay line", *Optics Express*, vol. 19, no. 26, pp. B764-B769, 2011.
- [4] A.E. WILLNER, S. KHALEGHI, M.R. CHITGARHA, and O.F. YILMAZ, "All-Optical Signal Processing", *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 660- 680, 2014.
- [5] Pedro CHAMORRO-POSADA, Rafael GÓMEZ-ALCALÁ, and Francisco Javier FRAILE-PELÁEZ, "Study of Optimal All-Pass Microring Resonator Delay Lines With a Genetic Algorithm", *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 8, pp. 1477-1481, 2014.
- [6] Haijuan JU, Liyong REN, Xiao LIN, Jian LIANG, and Chengju MA, "Wide-Range Continuously-Tunable Slow-Light Delay Line Based on Stimulated Brillouin Scattering", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 19, pp. 1920-1923, 2013.
- [7] Santiago TAINTA, María J. ERRO, María J. GARDE, Miguel A. MURIEL, "Línea de retardo sintonizable eléctricamente para trenes de pulsos ópticos basada en el efecto de autoimagen temporal", *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 45, no. 2, pp. 113-119, 2012.
- [8] Ming XIN, Feifei YIN, Cheng LEI, Minghua CHEN, Hongwei CHEN, Chao TANG, and Shizhong XIE, "Broadband tunable optical delay based on real-time Fourier transformation and ramp-type phase modulation", *Optics Letters*, vol. 35, no. 10, pp. 1596-1598, 2010.
- [9] Santiago TAINTA, María J. ERRO, María J. GARDE and Miguel A. MURIEL, "Temporal self-imaging effect for periodically modulated trains of pulses", *Optics Express*, vol. 22, no. 12, pp. 15251-15266, 2014.
- [10] J. T. MOK and B. J. EGGLETON, "Impact of group delay ripple on repetition-rate multiplication through Talbot self-imaging effect", *Optics Communications*, vol. 232, no. 1-6, pp 167-178, 2004.